

高周波で用いる小型パワートランスの設計技術修得

第三技術室 システム制御班 本 堂 義 記

1. はじめに

高周波回路で用いられるトランスの効率は、そのトランスを構成する鉄心および巻線の材料や配置により大きく左右される。本研修は、パワー回路では高周波使用とされる小出力電圧で大電流出力の数 kHz～数十 kHz で駆動する小型パワートランスの設計技術修得を試みる。すなわち、高周波による表皮効果を大駆動電流で用いるために考慮し、さらに出力電圧が漏れインダクタンスよりインピーダンス降下することを考慮するトランスを設計対象とする。昨年の研修では、巻線に既存する抵抗損を減少する最適な撚り線（リッツ線）を用いる設計方法の技術修得を行い、今回の研修では巻線の構造配置による漏れインダクタンスの減少方法の設計技術修得を試みる。

2. 試作トランスの設計

対象の小型パワートランスは昨年と同様にインバータ溶接機の出力端などに使用する出力容量 2 KVA で 10 V、200A 出力の仕様とするが、利用できる可変周波数電源装置の都合上、実際は表 1 に示す 1/40 倍のモデルパワートランスとする。

定格出力容量	50 [VA]	相 数	単 相
一 次 電 圧	28 [V]	駆動周波数	2～20 [KHZ]
二 次 電 圧	2 [V]	出力波形	方形波
二 次 電 流	25 [A]	コア形状	外鉄形

表 1 モデルパワートランスの仕様

2. 1 基本設計

鉄心材料および寸法は昨年の研修で用いた図 1 に示す高周波仕様のフェライト EI カットコアを使用する。その特性・寸法を表 2 に示す。また、巻線の巻数も昨年の設計値と同様で一次巻線数 $N_p=38$ 回、二次巻線数 $N_s=4$ 回とする。

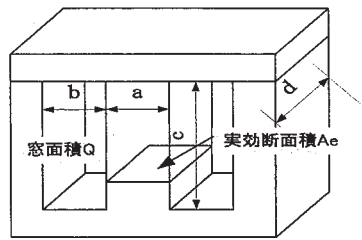


図 1 コアの形状

品 名	TDK、Mz-Zn フェライト、EI50-Z		
材 質	H7C1 材、電源用	鉄心寸法[mm]	
使用 f	300 KHz 以下	a	15.0
飽和 Bm	0.45 [T]	b	9.7
A l 値	3960 [nH/N ²]	c	24.5
透磁率	1296 [H/m]	d	15.0

表 2 フェライトコアの特性（公称値）

2. 2 巻線構造の設計

変換効率の高いトランスを製作するには、巻線抵抗と漏れインダクタンスを小さく、結合係数が1になるように設計することが重要であり、結合係数を1に近づけるため高透磁率の鉄心を設けて巻線自己インダクタンスを大きくし、漏れ磁束による漏れインダクタンスを減少するために鉄芯に巻線をできるだけ密着して巻き施すことが必要となる。このことより、普通は一次巻線を鉄心に密着して巻き、二次巻線は一次巻線の外側に巻き施すことが一般的に知られている。すなわち、インダクタンスに2乗で関係する巻数の多い一次側を鉄芯に密着させ、損失による温度上昇が高い二次側を放熱し易い外側に施す。

しかし、本研修でのパワートランスの場合は変圧比が $a = 9.5$ と普通のトランスに比べ大きく、出力電圧が小さく、大出力電流を必要とするため、かならずしも通常設計法が正しいとは限らない。

このことより、巻線構造配置を図2に示すように変え、漏れインダクタンスについて検討を行った。トランスの各損失を表わす二次側を一次側に換算した一般的な等価回路を図3示す。図における $x1$ および $x2$ がトランスの漏れインダクタンスを表す漏れリアクタンスを示し、周波数が大きくなるとその値は大きくなる。

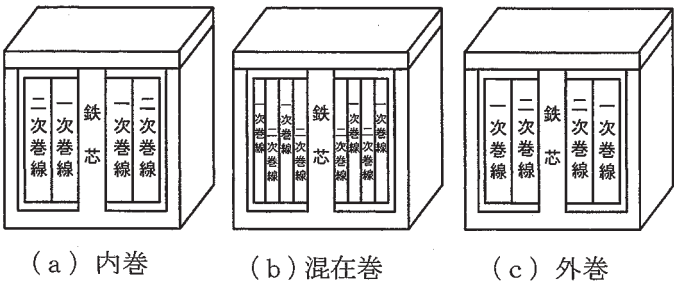


図2 巻線構造配置

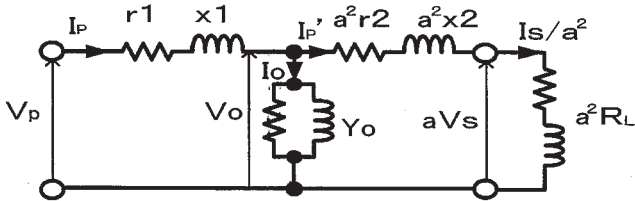


図3 トランス等価回路

2. 3 撚り線の決定

巻線の交流時における表皮効果による電流密度は (11) 式で求められる。

$$J_{AC} = J_{DC} \times \sqrt{\frac{a}{r}} \times e^{-\frac{a-r}{\delta}} \quad (11)、$$

$$\text{ただし、} \delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu}} \quad (12)$$

ここで、 J_{AC} : 交流時の電流密度 $[A/m^2]$ 、 J_{DC} : 直流時の電流密度 $[A/m^2]$ 、 a : 導体の半径 $[m]$ 、
 r : 導体中心よりの距離 $[m]$ 、 δ : 表皮の深さ $[m]$ 、 ω : 各周波数 $[rad/s]$ 、
 σ : 導体の導電率 $[1/(\Omega \cdot m)]$ 、 μ : 導体の透磁率で導体の場合 $4\pi \cdot 10^{-7}$

以上の (12) 式で求められた表皮の深さを表3に示す。

表3の結果と昨年の研修の結果である表面積と断面積の比が

10 倍程度必要であることを考慮して、一次側および二次側巻線とも 0.5mm の銅素線を用いて撚り線とする。その評価を表4に示す。また、構造変化による巻線抵抗を同じにするため一次、二次の巻線長さをいずれについても同じとする。

周波数 [Hz]	60	5000	10000	20000	50000
表皮の深さ [mm]	8.53	0.935	0.661	0.467	0.296

表3 周波数による表皮の深さ

	撚り線数	定格時の電流密度	断面積	表面積	表面積／断面積
一次側巻線	4 本	3.35×10^6 [A/m ²]	0.785×10^{-6} [m ²]	6.283×10^{-6} [m]	8.00
二次側巻線	38 本	3.35×10^6 [A/m ²]	7.461×10^{-6} [m ²]	59.7×10^{-6} [m]	8.00

表 4 0.5 mm銅線の撚り線評価

3. 特性実験

図 2 に示す巻線構造配置のトランスを実際に試作し、その特性を一般に知られている試験方法である直流抵抗試験、巻数比試験、無負荷試験、短絡試験を行い、検討する。

ただし、直流抵抗試験以外はインバータなどで利用する事を想定し、駆動周波数を 2～20KHz まで可変した方形波で実験する。

3. 1 実験結果

(1) 直流抵抗試験

各試作トランスの 75℃換算の直流抵抗は a. 内巻、b. 混在巻、c. 外巻のいずれの場合も一次巻線抵抗=0.12 [Ω]、二次巻線抵抗=0.0018 [Ω]と求められる。

(2) 巻数比試験

鉄芯の磁束密度 $B_m=0.38$ [T] 時で入力電圧 25V、駆動周波数 2KHz の一次・二次の変圧比を表 5 に示す。

トランス	内巻	混在巻	外巻
変圧比	9.5	9.6	9.7

(3) 無負荷試験

鉄心特性に大きく左右されるが、巻線配置による無負荷損を求める。ただし、トランスの鉄心寸法を 2KHz で設計したため、それ以上に周波数が増加すると十分な磁束密度 B_m が得られないことと測定器の関係で

表 5 巻数比試験 ($V_p=25V$ 、2KHz)

トランス	内巻	混在巻	外巻
無負荷損失[W]	0.88	0.68	0.75

10KHz 以上では正確なデータを得られなかった。表 6 は安定したデータが得られた入力電圧 25V、駆動周波数 2KHz 時 ($B_m=0.38$ [T]) の無負荷損失を示す。

表 6 無負荷試験 ($V_p=25V$ 、2KHz)

(4) 短絡試験

巻線配置による漏れインダクタンスを求める。すなわち、トランスの全巻線インピーダンスを求め、回路中の全抵抗を除くと求まる。

ただし、一次・二次巻線別に漏れインダクタンスを求めることができないため、回路全体の値を求め考察する。

図 4 に一次側電流 $I_p=2.63$ A (定格電流、二次側換算電流 $I_s=25A$)、 $I_p=2.00$ A ($I_s=19A$)、 $I_p=1.00A$ ($I_s=9.5A$) 時の各周波数における 75℃に換算した銅損を示す。

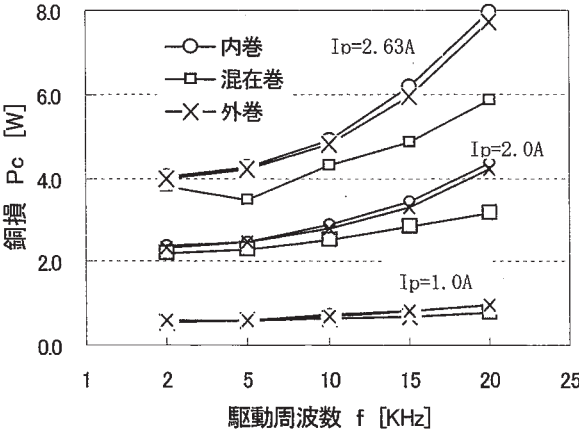


図 4 各周波数の銅損 (75℃換算)

また、図5に漏れインダクタンスを示す。
ただし、一次電流による各周波数における漏れインダクタンスの変動は5%以内のため $I_p=2.00\text{ A}$ ($I_s=19\text{ A}$) 時の値を代表して示す。

3. 2 評価と考察

巻線構造配置による各周波数における漏れインダクタンスは、研修結果では図5に示すように一次巻線と二次巻線を混在させ巻き施す配置が最小となった。今回のモデルトランスでは変圧比が大きく、2乗で回路に影響を及ぼす2次側の漏れインダクタンスを減少させるためには一次巻線を普通と逆の外側に配置し、二次巻線を鉄芯に密着させる方が最適と考えたが、実験結果では混在まきが最適となった。これは一次巻線と二次巻線の結合度が高くなり、同時に漏れ磁束が減少し磁気抵抗が減少したためと考えられる。表6の無負荷試験結果よりも漏れ磁束が減少することによる鉄心損失の減少が見られる。

しかし、巻数比試験では外巻の変圧比が最適になっているが、これは1次側巻線が一番外に配置するため二次巻線が一次巻線の漏れ磁束も捕捉するためと考える。

また、図4の各周波数における銅損結果より混在巻による銅損減少も見られた。銅損は抵抗損より求められ、各巻線構造配置とも同じ長さの撚り線を使用すれば銅損の変化は見られないと考えたが、理解が困難である。理由としては表皮効果現象に巻線配置が影響を及ぼした可能性も考えられる。

表皮効果については、一次電流が高く周波数が高くなるほど銅損が増加している傾向からよく理解できる。

4. あとがき

高周波域での漏れインダクタンスはトランスの出力方式や変圧比にも左右されるが、一次側および二次側巻線の配置を考慮することで低減できることが今回の研修により求められた。

また、昨年の研修による撚り線を使用したにもかかわらず、表皮効果減少に今回の巻線構造配置が影響することが実験結果より求められた。

今後は実験によるデータをさらに積み重ね、混在巻きの中で最適な混在方法を検討する必要がある。最後に、高周波使用のパワートランス設計は、2年間の研修を通し仕様範囲による材料構造・配置を考慮することが重要であることがわかり有意義な日常研修であった。

5. 参考文献

- | | |
|-------------------------|---------------------------|
| 1) 山村 英穂 : トロイダル・コア活用百科 | CQ 出版社 (1983) |
| 2) 砂川 重信 : 理論電磁気学 | 紀伊国屋 (1987) |
| 3) 本堂 義記 : 小型高周波トランスの開発 | 福井大学技術報告集 (2003年度、Vol. 9) |

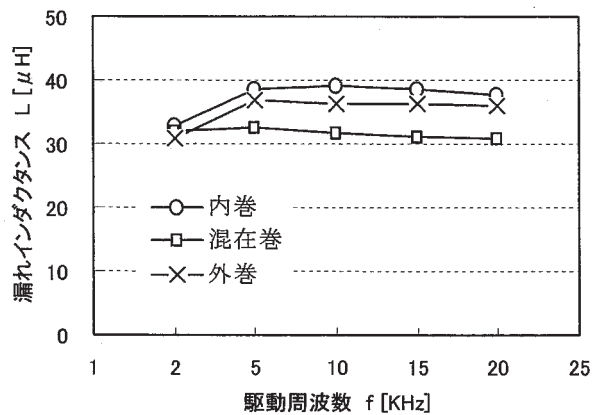


図5 各周波数の漏れインダクタンス